

Determinación de la huella hídrica y modelación de la producción de biomasa de cultivos forrajeros a partir del agua en la sabana de Bogotá (Colombia)

Contenido

Agradecimientos	V
Resumen	VII
Resum	X
Summary	XIII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	6
1.2 Justificación	7
1.2.1 Desde el punto de vista de la utilidad	7
1.2.2 Desde el punto de vista científico.....	8
1.2.3 Desde el punto de vista tecnológico.....	8
1.2.4 Desde el punto vista de la eficiencia	9
1.3 Objetivos	10
1.3.1 Objetivo Principal.....	10
1.3.2 Objetivos Específicos.....	10
1.4 Metodología general y estructura de la tesis	10
1.5 Porqué es novedoso este proyecto?	12
2. MODELACIÓN DE CULTIVOS	15
2.1 Modelos de Simulación	15
2.2 El Modelo AquaCrop	19
2.2.1 Características del modelo.....	20
2.2.2 Ventajas del modelo	24
2.2.3 Limitaciones del modelo.....	27
2.2.4 Cálculos y algoritmos más relevantes del modelo	29
2.2.4.1 Balance hídrico	30

2.2.4.2	Sub – rutina de redistribución y drenaje.....	33
2.2.4.3	Sub – rutina de escorrentía superficial	34
2.2.4.4	Sub - rutina de infiltración	35
2.2.4.5	Sub – rutina de evapotranspiración	36
2.2.4.5.1	Sub – rutina de evaporación	37
2.2.4.5.2	Evaporación real del suelo (E)	39
2.2.4.5.3	La transpiración del cultivo (Tr).....	41
2.2.4.6	Proceso de extracción de agua del suelo	46
2.2.5	Simulación de los desarrollos agronómicos del cultivo	47
2.2.5.1	Desarrollo del dosel.....	47
2.2.5.2	Expansión de la zona de raíces	51
2.3	Huella hídrica	52
2.3.1	Productividad hídrica del cultivo.....	56
2.3.2	Productividad hídrica normalizada del cultivo (WP*).....	56
2.3.3	Ajuste de la productividad hídrica normalizada WP* para CO2.....	57
2.3.4	Productividad hídrica normalizada con ajustes completos	57
2.4	Producción de biomasa.....	57
2.4.1	Ajuste de la producción de biomasa a la temperatura del aire	58
2.4.2	Producción de biomasa aérea entre cortes	59
2.5	Índice de cosecha.....	59
2.5.1	Construcción del índice de cosecha para cultivos herbáceos de hoja ...	60
2.5.2	Índice de cosecha para pastos y forrajes	61
2.6	Estrés hídrico.....	61
2.6.1	Estrés en la etapa reproductiva.....	64
2.6.2	Estrés en la apertura de estomas.....	66
2.6.3	Estrés en la polinización	68
2.6.4	Variables de estrés hídrico consideradas por AquaCrop.....	69
2.6.4.1	Umbral de agotamiento del agua en el suelo para expansión del dosel - Umbral superior	69
2.6.4.2	Umbral de agotamiento del agua en el suelo para expansión del dosel - Umbral inferior	69
2.6.4.3	Factor de forma para el coeficiente de estrés hídrico para la expansión del dosel.....	70
2.6.4.4	Umbral de agotamiento de agua en el suelo para control estomático - Umbral superior	71
2.6.4.5	Factor de forma para el coeficiente de estrés hídrico para control estomático.....	72
2.6.4.6	Umbral de agotamiento de agua en el suelo para senescencia del dosel - Umbral superior	72
2.6.4.7	Factor de forma para el coeficiente de estrés hídrico para senescencia del dosel.....	72
2.7	Variables y parámetros de entrada al modelo AquaCrop	73
2.7.1	Datos climáticos.....	73

2.7.2	Características del cultivo	73
2.7.3	Parámetros conservativos y de usos específicos.....	74
2.7.3.1	Umbrales de temperatura del aire	77
2.7.3.2	Desarrollo de la cobertura del dosel	79
2.7.3.3	Floración o inicio de formación de la cosecha.....	82
2.7.3.4	Desarrollo de la zona de raíces.....	83
2.7.3.5	Transpiración del cultivo	85
2.7.3.6	Producción de biomasa y formación de cosecha	86
2.7.3.7	Índice de cosecha	86
2.7.3.8	Estrés de temperatura del aire	91
2.8	Resultados del modelo AquaCrop.....	92
3.	METODOLOGÍA.....	94
3.1	Experimentación en campo	94
3.1.1	Caracterización del sitio experimental.....	95
3.1.2	Antecedentes del Lote.....	95
3.1.3	Suelos.....	96
3.1.4	Clima.....	97
3.1.5	Infraestructura	99
3.2	Materiales agrícolas usados	99
3.3	Metodología experimental usada	100
3.3.1	Diseño del sistema de riego.....	101
3.3.2	Diseño del sistema de drenaje.....	106
3.3.3	Diseño estadístico	106
3.3.4	Procedimientos de campo	108
3.3.4.1	Análisis químicos y fertilización	108
3.3.4.2	Análisis físicos.....	110
3.3.4.2.1	Densidad aparente	110
3.3.4.2.2	Retención de humedad	111
3.3.4.2.3	Infiltración del suelo.....	111
3.3.4.3.4	Conductividad hidráulica saturada.....	112
3.3.4.3.5	Humedad del suelo y calibración del TDR	112
3.4	Instalación de los experimentos en campo	114
3.4.1	Experimentos realizados.....	115
3.4.2	Siembra de raigrás (Lolium perenne)	115
3.4.3	Siembra de avena forrajera (Avena sativa)	116
3.5	Toma de información en campo y sistematización.....	117
3.5.1	Variables previstas	117
3.5.2	Evapotranspiración de referencia.....	121
3.5.3	Balance hídrico y cálculo de Kc, Kcb y Ke	121
3.5.4	Metodología del riego	123
3.5.5	Sistematización de la información.....	130

3.6 Metodología para la determinación de los parámetros y variables del cultivo para el modelo AquaCrop.....	131
3.6.1 Temperaturas base y corte	131
3.6.2 Cobertura de la superficie del suelo por una semilla individual al 90% de emergencia (Cs).....	132
3.6.3 Número de plantas por hectárea.....	133
3.6.4 Tiempo de siembra a emergencia.....	134
3.6.5 Coeficiente de crecimiento del dosel.....	134
3.6.6 Máxima cobertura del dosel.....	135
3.6.7 Tiempo de siembra a inicio de senescencia.....	135
3.6.8 Coeficiente de declinación del dosel.....	136
3.6.9 Tiempo de siembra a madurez.....	136
3.6.10 Tiempo de siembra a floración.....	136
3.6.11 Longitud del estado de floración.....	137
3.6.12 Determinancia del cultivo (unión/separación de floración).....	137
3.6.13 Profundidad de raíz mínima efectiva.....	138
3.6.14 Profundidad de raíz máxima efectiva.....	139
3.6.15 Factor de forma que describe la zona de expansión de la raíz.....	139
3.6.16 Tiempo desde siembra a la máxima profundidad de raíces.....	140
3.6.17 Coeficiente del cultivo cuando el dosel está completo pero previo a la senescencia.....	141
3.6.18 Factor de declinación del cultivo.....	141
3.6.19 Efecto de cobertura del dosel sobre la reducción de evaporación del suelo en el estado de estación tardía.....	142
3.6.20 Productividad hídrica normalizada para ETo y CO2.....	143
3.6.21 Productividad hídrica normalizada durante la formación de la cosecha.....	144
3.6.22 Índice de cosecha de referencia.....	145
3.6.23 Construcción del índice de cosecha.....	145
3.6.24 Sumatoria de ETo durante el período de estrés que puede ser excedido antes de la activación de la senescencia.....	146
3.6.25 Porcentaje de humedad en el punto anaeróbico en %Vol (con referencia a saturación).....	147
3.7 Estrés hídrico	148
3.7.1 Descripción del sitio experimental.....	148
3.7.2 Materiales utilizados.....	148
3.7.3 Diseño experimental.....	149
3.7.4 Variables y parámetros de AquaCrop sobre estrés hídrico.....	152
3.7.4.1 Umbral de agotamiento del agua en el suelo para expansión del dosel - Umbral superior.....	152
3.7.4.2 Umbral de agotamiento del agua en el suelo para expansión del dosel - Umbral inferior.....	152
3.7.4.3 Factor de forma para estrés hídrico para la expansión del dosel.....	153

3.7.4.4 Umbral de agotamiento de agua en el suelo para control estomatal - Umbral superior.....	153
3.7.4.5 Factor de forma para estrés hídrico para control estomático.....	154
3.7.4.6 Umbral de agotamiento de agua en el suelo para senescencia del dosel - Umbral superior	155
3.7.4.7 Factor de forma para estrés hídrico para senescencia del dosel.....	156

4. METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO AQUACROP PARA AVENA FORRAJERA Y RAIGRAS.158

4.1 Aspectos Preliminares	158
4.1.1 Módulo de Clima	159
4.1.2 Módulo de Cultivo.....	159
4.1.3 Módulo de Perfil del Suelo	160
4.1.4 Módulo de Irrigación	160
4.1.5 Módulos de Manejo de Campo y Nivel Freático	160
4.2 Análisis de sensibilidad de variables.....	161
4.3 Proceso de calibración	161
4.4 Proceso de validación.....	166
4.5 Modelo PEST	166
4.6 Indicadores estadísticos Usados	170
4.6.1 Coeficiente de determinación (R ²).....	170
4.6.2 Raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE)	171
4.6.3 Raíz cuadrada del error cuadrático medio normalizado (NRMSE).....	171
4.6.4 Coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (EF).....	171
4.6.5 Índice de ajuste de Willmott (d).....	172
4.7 Simulación de otras condiciones agroecológicas para evaluar la sensibilidad del cultivo al complejo Suelo – Agua - Clima.....	172
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	174
5.1 Caracterización de los experimentos.....	174
5.2 Suelos	174
5.2.1 Análisis químicos.....	174
5.2.2 Análisis físicos e hidrodinámicos.....	176
5.3 Clima	180
5.4 Ciclos fenológicos.....	182
5.4.1 Avena forrajera (Avena sativa, L.) var. Cayuse	182
5.4.2 Raigrás (Lolium perenne) var. Bestfor plus	183

5.5 Análisis estadísticos	185
5.5.1 Análisis para avena forrajera	186
5.5.2 Análisis para raigrás	189
5.6 Resultados experimentales	196
5.6.1 Evapotranspiración de referencia.....	197
5.6.2 Huella hídrica, curvas de Kcb, Kc, y Ke.....	198
5.6.3 Humedad del suelo.....	200
5.6.4 Cobertura del dosel	205
5.6.5 Curvas de biomasa y producción.....	207
5.6.6 Funciones de producción, implicaciones económicas de la huella hídrica.....	216
5.6.6.1 Para avena forrajera	217
5.6.6.2 Para raigrás.....	218
5.7 Cálculo y generación de las variables y parámetros para AquaCrop.....	220
5.7.1 Temperaturas base y corte	225
5.7.2 Cobertura de la superficie del suelo por una semilla individual al 90% de emergencia.....	226
5.7.3 Número de plantas por hectárea.....	226
5.7.4 Tiempo de siembra a emergencia.....	227
5.7.5 Coeficiente de crecimiento del dosel.....	227
5.7.6 Máxima cobertura del dosel.....	230
5.7.7 Tiempo de siembra a inicio de senescencia.....	231
5.7.8 Coeficiente de declinación del dosel	233
5.7.9 Tiempo de siembra a madurez.....	237
5.7.10 Tiempo de siembra a floración.....	237
5.7.11 Longitud del estado de floración	238
5.7.12 Cultivo determinado unido con floración.....	238
5.7.13 Profundidad de raíz mínima efectiva	239
5.7.14 Profundidad de raíz máxima efectiva	241
5.7.15 Factor de forma que describe la expansión de la raíz.....	241
5.7.16 Tiempo de siembra a la máxima profundidad de raíces.....	242
5.7.17 Coeficiente del cultivo cuando el dosel está completo pero previo a senescencia.....	242
5.7.18 Factor de declinación del cultivo	243
5.7.19 Efecto de la cobertura del dosel sobre la reducción de la evaporación del suelo en el estado de estación tardía.....	245
5.7.20 Productividad hídrica normalizada	248
5.7.21 Productividad hídrica normalizada durante la formación de la cosecha.....	250
5.7.22 Índice de cosecha de referencia	250
5.7.23 Construcción del índice de cosecha.....	251

5.7.24 Sumatoria de ET_0 durante el periodo de estrés que puede ser excedido antes de la activación de la senescencia	252
5.7.25 Punto anaeróbico del cultivo	252
5.8 Estrés hídrico	255
5.8.1 Diferencias entre tratamientos. Análisis Estadístico	255
5.8.1.1 Avena forrajera	255
5.8.1.2 Raigrás	256
5.8.2 Evolución temporal de las variables respuesta	257
5.8.3 Interpretación del Coeficiente de estrés hídrico	260
5.8.4 Ajuste de los coeficientes de estrés hídrico para AquaCrop	263
6. RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO AQUACROP PARA AVENA FORRAJERA Y RAIGRÁS.	266
6.1 Análisis de sensibilidad de variables	266
6.2 Calibración del modelo para cultivos forrajeros	270
6.2.1 Caso Avena Forrajera	270
6.2.2 Caso Raigrás	274
6.2.3 Comparaciones	278
6.3 Validación	279
6.3.1 Caso avena forrajera	279
6.3.2 Caso Raigrás	280
6.4 Simulación de otras condiciones agroecológicas para evaluar la sensibilidad del cultivo al complejo Suelo – Agua - Clima	282
6.4.1 Comportamiento del modelo AquaCrop con la variación de diferentes láminas totales de riego aplicadas al cultivo	282
6.4.2 Comportamientos del modelo AquaCrop considerando varios niveles de fertilización del suelo.	284
6.4.3 Comportamiento del modelo AquaCrop considerando diferentes texturas del suelo.	286
6.4.4 Comportamiento del modelo AquaCrop considerando varios niveles freáticos del suelo.	289
6.5 Articulación de los resultados obtenidos	291
6.5.1 Integración para la Avena Forrajera	291
6.5.2 Integración para Raigrás	293
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	296
7.1 Respecto a la Sabana de Bogotá como ecosistema experimental	296
7.2 Respecto al Modelo AquaCrop (FAO)	297

7.3 Respecto a la metodología empleada	299
7.4 Respecto a los resultados obtenidos	300
7.5 Respecto de las respuestas de los forrajes estudiados al estrés hídrico	302
7.6 Respecto de la calibración y validación del modelo AquaCrop para avena forrajera y raigrás.....	303
7.7 Respecto al logro de los objetivos planteados	304
7.8 Proyecciones de Investigación en el área	306
8. BIBLIOGRAFÍA.....	308
ANEXO A. PERFIL TAXONÓMICO DE LA SERIE DE SUELOS EN LA QUE SE DESARROLLARON LOS EXPERIMENTOS.....	326
ANEXO B. LA SABANA DE BOGOTÁ COMO ECOSISTEMA EXPERIMENTAL.....	332
B.1 Justificación.....	332
B.2 La cuenca de sabana de Bogotá.....	332
B.2.1 Descripción General.....	333
B.2.2 Administrativa	335
B.2.3 Complejo Físico	335
B.2.3.1 Morfología.....	336
B.2.3.2 Litofases y suelo	336
B.2.3.2 Clima	336
B.2.4 Vegetación y usos del suelo	337
B.2.4.1 Vegetación actual.....	337
B.2.4.2 Vegetación potencial	338